

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра радиотехники и электродинамики
наименование кафедры

Исследование распространения радиоволн в условиях городской застройки

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 2 курса 2233 группы

направления 03.04.03 «Радиофизика»
код и наименование направления

Института физики


наименование факультета

Шемякина Александра Дмитриевича

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

доцент, к.ф.-м.н., доцент
должность, уч. степень, уч. звание

 01.06.2026

дата, подпись

М.М. Слепченков

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой:

д.ф.-м.н., профессор
должность, уч. степень, уч. звание

 01.06.26

дата, подпись

О.Е. Глухова

инициалы, фамилия

Саратов 2026

ВВЕДЕНИЕ

В современных городах архитектура, инфраструктура и другие уникальные факторы окружающей среды оказывают значительное влияние на распространение электромагнитных волн [1]. Уже долгое время системы беспроводной связи работают в гигагерцовом диапазоне частот от 2,4 ГГц и с каждым днём эти частоты становятся только выше. Этот диапазон обеспечивает высокую скорость передачи данных, которая становится всё более необходима для функционирования умных городов, различных систем безопасности, автономных транспортных средств и других современных телекоммуникационных устройств [2]. Обратной стороной этого преимущества являются другие негативные по сравнению с более низкими частотами особенности. Чем выше частота передачи, тем сильнее проявляются эффекты затухания в атмосфере, поглощения энергии сигналов при прохождении через препятствия и иные явления искажения исходных сигналов [3-5]. В условиях плотной городской застройки сигнал может многократно переотражаться, интерферировать и ослабевать, что становится причиной появления зон слабого приёма передаваемых сигналов [6,7]. Актуальность работы обусловлена повсеместной необходимостью точного прогнозирования качества связи в условиях городской застройки, при уже существующих теоретических и программных моделях, часто дающих лишь приблизительную оценку характеристик сигнала, требующих дополнительной настройки для каждого конкретного случая и экспериментального подтверждения для уточнения результатов.

Целью данной работы является исследование особенностей распространения гигагерцевых волн в городских условиях и анализ полученных данных с позиции проектирования новых и модернизации существующих схем городской застройки и моделей по анализу городских застроек.

Задачи работы включают:

- Сборку измерительной установки сигналов.

- Написание программ для работы передатчика и приёмника радиосигналов гигагерцового диапазона.
- Конструирование из различных, часто встречаемых в городах материалов изолирующих передаваемые сигналы препятствий.
- Измерение зависимости значений мощности принятых сигналов от расстояния, мощности передатчика, находящихся между приёмником и передатчиком препятствий и других условий окружающего пространства.

В структуре работы можно выделить несколько составных частей. Во введении обосновывается актуальность темы исследования, формулируются цели и задачи работы. Первая глава, состоящая из 4 параграфов, посвящена физическим основам передачи радиосигналов; проблемам, возникающим при этом процессе, и способам их решения. Вторая глава состоит из 3 параграфов. Она включает в себя описание распространённых передающих устройств гигагерцового диапазона и технических средств, необходимых для симуляции их работы. В третью главу включены 4 параграфа. Здесь приведены описания лабораторной установки, проводимых испытаний и полученные в их ходе результаты. В заключении сформулированы основные результаты и выводы проведенного исследования.

Основное содержание работы.

Для проведения эмпирических измерений была собрана измерительная установка (рисунок 1). Для правильной работы микроконтроллеров необходимы несколько программ. Программы были написаны и работают только на Arduino IDE 2.0 или более новых версиях [8-10].

Первые измерения проводились на улице без прямых препятствий для передачи сигнала. Условия этих измерений наиболее близко похожи на свободное пространство, однако, очевидно не являются им, так как в условиях городской застройки всегда присутствуют объекты и дополнительные шумы, с которыми будет взаимодействовать передаваемый сигнал. Найти в городе свободное пространство практически невозможно, поэтому данные замеры будут использованы как наиболее идеализированное пространство и отправная точка

измерений. Изображение свободного пространства с ракурса приёмника изображено на рисунке 2.

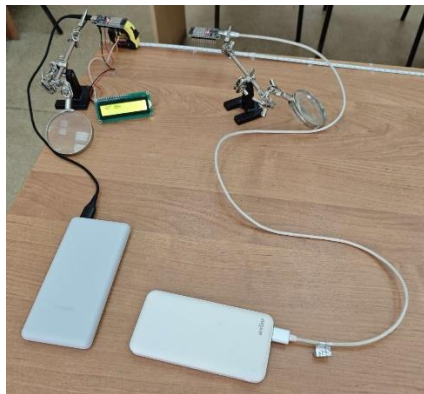


Рисунок 1 – Измерительная установка Рисунок 2 – “Свободное” пространство

Для фиксации антенн и установки их на одной оси использовались держатели “третья рука”. Для наиболее удобного контроля и сбора результатов к приёмнику сигналов был подключён жидкокристаллический дисплей 1602A. На рисунках 4, 5, 6 изображены теоретические и практическая схемы, используемые для подключения LCD к ESP32.

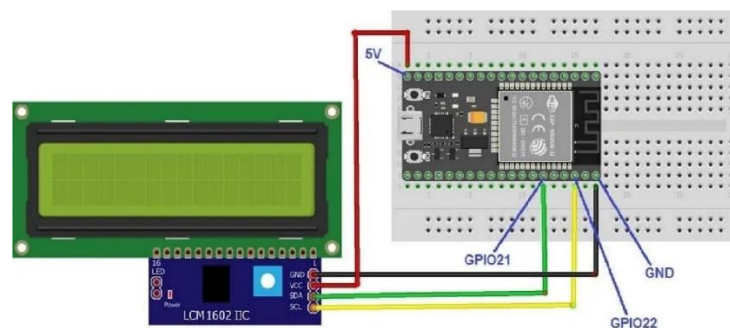


Рисунок 4 – Теоретическая схема подключение LCD дисплея 1602A к ESP-32

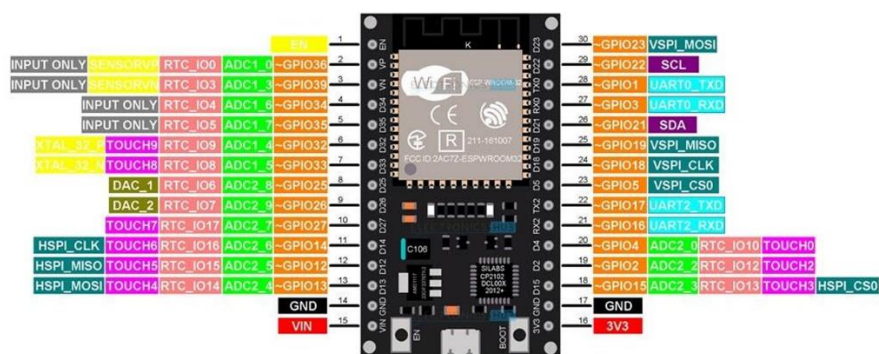


Рисунок 5 – Выводная схема ESP32

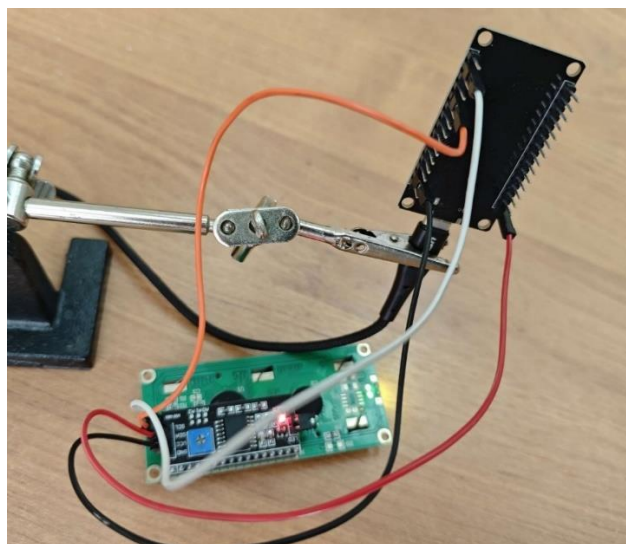


Рисунок 6 – Подключение ESP32 и LCD 1602A

В момент принятия сигнала микроконтроллер выводил его мощность на подключённый дисплей. Для анализа последующих данных необходимо представлять, как в теории должен изменяться сигнал с расстоянием. Проводим первые измерения на улице. Их результаты представлены на рисунке 9.



Рисунок 9 – Зависимость мощности принимаемого сигнала в “свободном” пространстве, на большой дистанции

В целом можно увидеть, что график геометрически повторяет классическую картину затухания сигнала, однако, в трёх местах очевидны искажения от переотражений и других шумов. Полученные значения точны и повторяются при многократных повторных измерениях.

Далее проводятся исследования на меньших дистанциях, с меньшим шагом по расстоянию. Проведя одинаковые измерения на улице и в помещении, появляется возможность сравнить их. Результаты этих измерений представлены на рисунке 10. Из графика на рисунке 10 видно, что потери от передачи в “свободном” пространстве зачастую значительно меньше, чем при передаче в помещении. Это преимущественно связано с множественными переотражениями искажённых разными способами в разных местах компонентами изначального сигнала, но на результат также влияет и повышенное количество посылающих различные сигналы передатчиков, которых в зданиях обычно больше, чем на пустой улице.

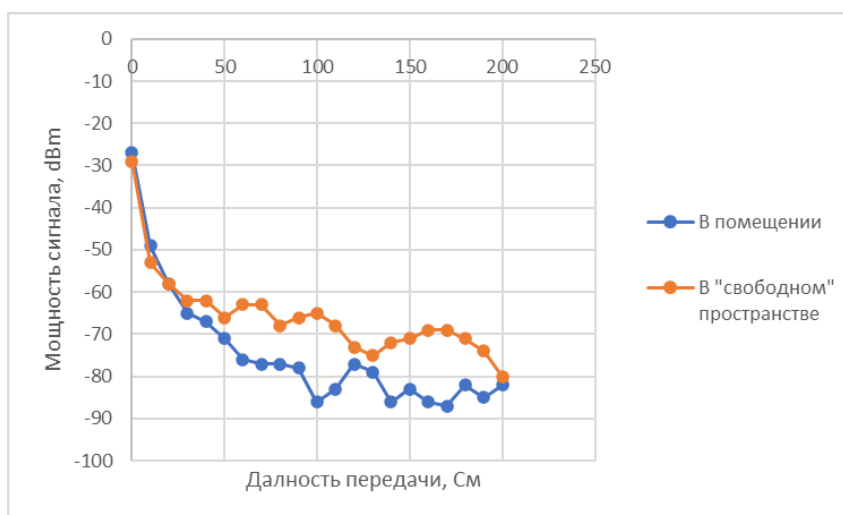


Рисунок 10 – Сравнение мощности принимаемого сигнала в условиях “свободного” пространства и помещения

В следующих опытах были проведены идентичные измерения в помещении с изменением изначальной мощности передаваемого сигнала. Результаты этих опытов представлены на рисунке 11. Полученные данные указывают на то, что от изменения мощности передачи на малых расстояниях, без препятствий, мощность приёма практически не изменяется, и изменения находятся на уровне погрешности. В следующих экспериментах сигнал проходит через препятствие из железобетона и гипсокартона. Результаты измерений представлены на рисунке 12. В этом опыте передатчик отдаляется от приёмника в определённый момент проходя сквозь препятствие. Хорошо заметны 4 разных

этапа распространения сигнала: 1) первый этап (от 0 до ~110 см) характеризует классическое распространение и затухание сигнала; 2) на втором этапе (от 110 и до 150 см) переотражения сигнала от находящейся в непосредственной близости стены приводят к значительным изменениям мощности принимаемого сигнала; 3) на 3 этапе наблюдается отсутствие значений принимаемого сигнала; 4) последний этап также в основном показывает классическую картину затухания сигнала.

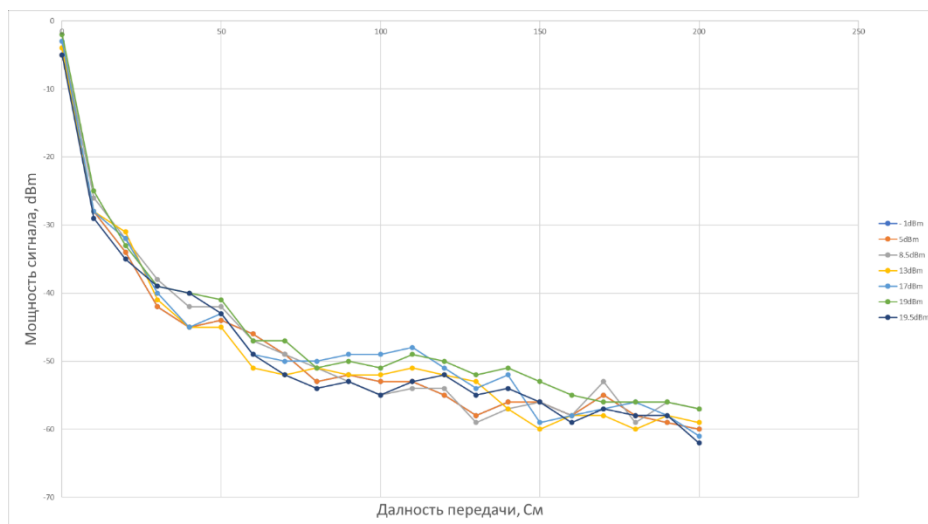


Рисунок 11 – Зависимость мощности принимаемого сигнала от дистанции передачи при разных значениях мощности передатчика

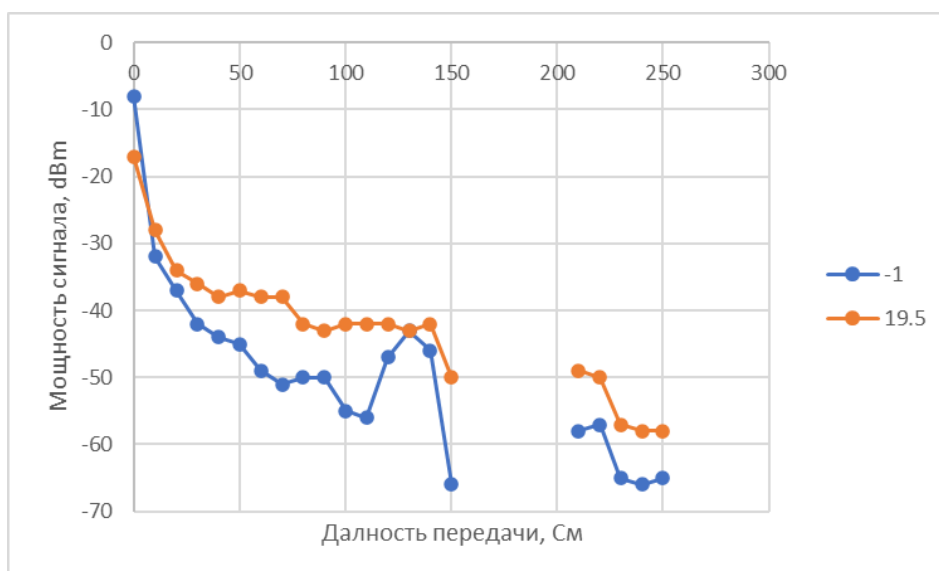


Рисунок 12 – Зависимость мощности принимаемого сигнала от расстояния при его прохождении через препятствие из железобетона и гипсокартона и различных мощностях исходного передаваемого сигнала

Для проведения следующих экспериментов были собраны изолирующие препятствия из различных материалов, различной толщины. Этими препятствиями являются: газобетон толщиной 7 См, пенополистирол - 2.5 См, дерево - 2 См и гипсокартон - 1 См. Результаты этих измерений представлены на рисунке 13. Из полученных результатов видно, что значения пенополистирола состоящего на более чем 90% из воздуха незначительно отличаются от пространства без препятствий; газобетон предсказуемо поглотил больше всех остальных материалов энергии переданного сигнала; а дерево и гипсокартон поглотили сопоставимое количество энергии. Теоретически гипсокартон поглощает больше энергии чем деревянные препятствия, но деревянная конструкция уравнивает потери при передаче сигнала за счёт своей в двое большей толщины. Всё это ещё раз указывает на то, что выбор материала и его толщины оказывает значительное влияние на передаваемый в условиях городской застройки сигнал.

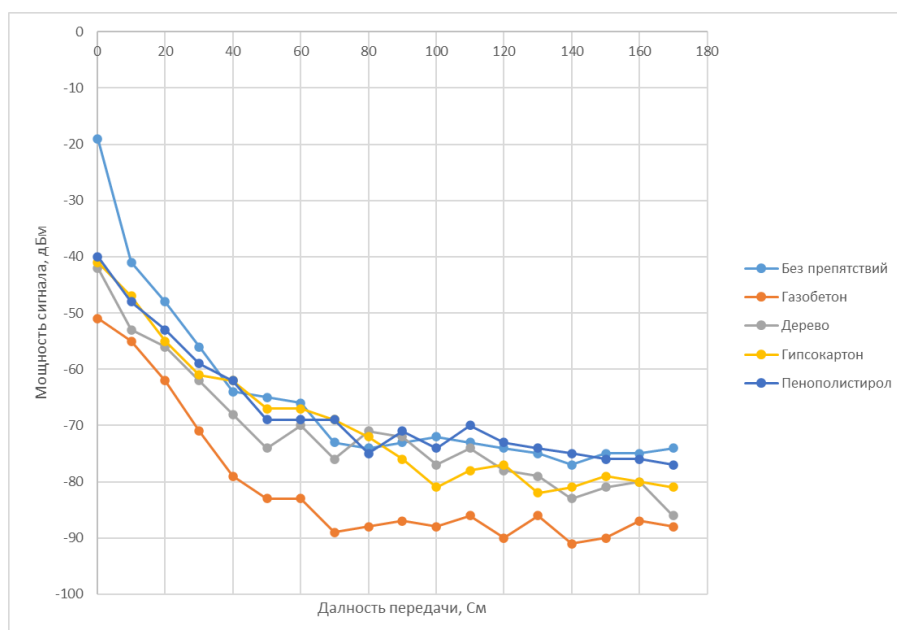


Рисунок 16 – Зависимость мощности принимаемого сигнала от расстояния при его прохождении через различные препятствия

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы была проведена сборка измерительной экспериментальной установки; был написан ряд программ для её работы и собраны макеты препятствий из различных материалов. В ходе исследования распространения волн гигагерцового диапазона в условиях городской застройки, были проанализированы ключевые аспекты, влияющие на качество и стабильность беспроводной связи. В сложной геометрии городов радиоволны подвергаются эффектам поглощения, затенения, отражения, дифракции и другим явлениям, приводящим к многолучевому распространению. Использование современных программных средств для моделирования распространения сигналов в условиях городской застройки могут помочь в проектировании базовых станций и других элементов сети для обеспечения максимального качества и покрытия связи. Несмотря на современность и технологичность подобных программ для моделирования, универсальной модели для точного определения напряжённости поля в заданной точке с различными условиями застройки и передачи не существует.

ESP32 – универсальный микроконтроллер, идеально подходящий для проведения подобных испытаний, а его работа в связке с Arduino и ESP-NOW является отличной альтернативой Bluetooth и Wi-Fi. Потери при передаче в “свободном” пространстве зачастую значительно меньше, чем при передаче в помещении, а изменения мощности передачи сигналов оказывает незначительное влияние на мощность принимаемого сигнала на малых расстояниях и без сильных фоновых шумов. Выбор же материалов и их толщины при строительстве зданий оказывает огромное влияние на передаваемый в условиях городской застройки сигнал.

Результаты работы могут быть использованы для предварительного планирования зоны покрытия WiFi в помещениях сложной планировки; разработки алгоритмов для робототехники, оценивающих качество связи через стены или подтверждения и упрощения компьютерных моделей радиоканалов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ротхаммель К. Антенны том 1 - Москва: Данвел, 2005 - 415с.
2. Мальцева Н.С., Бондаренко Д.С., Осовский А.В. Влияние факторов окружающей среды на системы связи пятого поколения / Мальцева Н.С., Бондаренко Д.С., Осовский А.В. // Автоматика и программная инженерия – 2022. - №3. – С. 54-58.
3. Гуреев А.В. Энергетические характеристики распространения электромагнитных волн внутри зданий - Москва: "МИЭТ", 2015 - 10с.
4. Новиков А.А., Сычев К.С., Михайлов М.С. Исследование процессов распространения волн в условиях городской застройки - Москва: "МЭИ", 2024 - 8с.
5. Панычев А. И., Ваганова А. А., Кисель Н. Н. Распространение радиоволн в локальных системах связи - Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2024. - 186 с.
6. Олейникова А.В., Нуртай М.Д., Шманов Н.М. Перспективы развития связи 5G/ Олейникова А.В., Нуртай М.Д., Шманов Н.М. // Современные материалы, техника и технологии - 2015. - № 2. - С. 233-235.
7. Мовчан Д.А., Сенченков Е.А., Ревич Ю.В., Синяева Г.И., Луценко С.В., Мовчан А.Г. ESP32-C3: Беспроводное подключение - Москва: «ДМК Пресс», 2023 - 442с.
8. Банци М., Шайло М. Первые шаги с Arduino. - 4 изд.: Пер. с англ. - СПб.: БХВ-Петербург, 2023 - 288 с.
9. Смирнова Е.В., Пролетарский А. В. и др. Технологии современных беспроводных сетей Wi-Fi -Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017 — 446с.
10. Глухова О.Е., Колосов Д.А. Программирование микроконтроллеров и электронных устройств – Саратов: СГУ им. Чернышевского, 2023. – 63 с